

1/5/2 (Item 2 from file: 351)
DIALOG(R)File 351:Derwent WPI
(c) 2005 Thomson Derwent. All rts. reserv.

10/539290

JC17 Rec'd PCT/PTO 16 JUN 2005

014452817 **Image available**
WPI Acc No: 2002-273520/ 200232
XRPX Acc No: N02-213275

Optical dispersion compensation element for optical communication system
has multilayered film containing high and low refractive index layer
groups of specific thickness relative to light wavelength

Patent Assignee: KIKUCHI K (KIKU-I); OYO KODEN KENKYUSHITSU KK (OYOK-N)

Number of Countries: 001 Number of Patents: 001

Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
JP 2001305339	A	20011031	JP 2000120486	A	20000421	200232 B

Priority Applications (No Type Date): JP 2000120486 A 20000421

Patent Details:

Patent No	Kind	Lan Pg	Main IPC	Filing Notes
JP 2001305339	A	14	G02B-005/28	

Abstract (Basic): JP 2001305339 A

NOVELTY - A multilayered film (100) having reflection layers (103-105) and transparent layers (108,109) is formed on a substrate. Refractive index of reflection layers is mutually different and transparent layers are arranged between the reflection layers so that high and low refractive index layers are arranged orderly. Thickness of each refractive index group layer is related with central wavelength of incident light.

USE - For optical communication system.

ADVANTAGE - Ensures effective compensation of light distortions, even in high speed and long range communication.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows a sectional view of multilayered film. (Drawing includes non-English language text).

Multilayered film (100)

Reflection layers (103-105)

Transparent layers (108,109)

pp; 14 DwgNo 1/6

Title Terms: OPTICAL; DISPERSE; COMPENSATE; ELEMENT; OPTICAL; COMMUNICATE; SYSTEM; MULTILAYER; FILM; CONTAIN; HIGH; LOW; REFRACT; INDEX; LAYER; GROUP; SPECIFIC; THICK; RELATIVE; LIGHT; WAVELENGTH

Derwent Class: P81; V07; W02

International Patent Class (Main): G02B-005/28

International Patent Class (Additional): H04B-010/02; H04B-010/18

File Segment: EPI; EngPI

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-305339

(43)Date of publication of application : 31.10.2001

(51)Int.Cl.

G02B 5/28
H04B 10/02
H04B 10/18

(21)Application number : 2000-120486

(71)Applicant : OYOKODEN LAB CO LTD
KIKUCHI KAZURO

(22)Date of filing : 21.04.2000

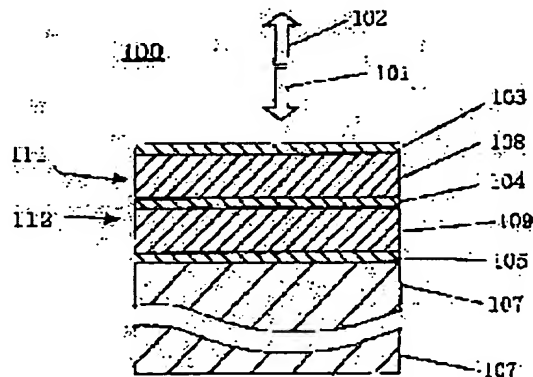
(72)Inventor : KIKUCHI KAZURO
TAKUSHIMA YUICHI
MARK KENNETH ZHABORONSKI
TANAKA YUICHI
KATAOKA HARUKI
KOJO KENJI
AZUMA SHIN
SATO KAZUYA

(54) OPTICAL DISPERSION COMPENSATION ELEMENT

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To solve the problem that a sufficient countermeasure for third order wavelength dispersion compensation which is not yet proposed, although the third or higher order wavelength dispersion compensation is still estimated to become necessary because accurate communication is hardly attained with the conventional method of wavelength dispersion compensation due to an accelerated communication bit rate and a lengthened communication distance in optical communication system using an optical fiber.

SOLUTION: The third order dispersion is completely compensated by forming an optical dispersion compensation element using a multilayer film formed of a first reflection layer, a first light-transmissive layer, a second reflection layer, a second light-transmissive layer and a third reflection layer successively with combination of a high refractive index layer (layer H) and a low refractive index layer (layer L). Then by constructing the multilayer film so as to make the film thickness very in directions in the incident plane, the optical dispersion compensation element capable of the third order dispersion compensation with respect to various incident light is manufactured. Insertion loss is suppressed to be ≤ 0.5 dB.



100: 多層膜
101: 入射光の方向を示す矢印
102: 出射光の方向を示す矢印
103, 104, 105: 反射層
106, 107: 光透過層
108: 基板(BK-7ガラス)
111, 112: キヤビティ

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than withdrawal
the examiner's decision of rejection or
application converted registration]

[Date of final disposal for application] 30.06.2003

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-305339 ✓

(P2001-305339A)

(43)公開日 平成13年10月31日(2001.10.31)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テ-マ-ド*(参考)
G 0 2 B 5/28		G 0 2 B 5/28	2 H 0 4 8
H 0 4 B 10/02		H 0 4 B 9/00	M 5 K 0 0 2
10/18			

審査請求 未請求 請求項の数34 O L (全 14 頁)

(21)出願番号 特願2000-120486(P2000-120486)

(22)出願日 平成12年4月21日(2000.4.21)

(71)出願人 391023312

株式会社応用光電研究室

東京都杉並区和田1丁目13番23号

(71)出願人 597173831

菊池 和朗

神奈川県横浜市港北区新吉田町1139-1

フォルム綱島クレスタワーズ1304

(72)発明者 菊池 和朗

神奈川県横浜市港北区新吉田町1139-1

フォルム綱島クレスタワーズ1304

(74)代理人 100085419

弁理士 大垣 幸

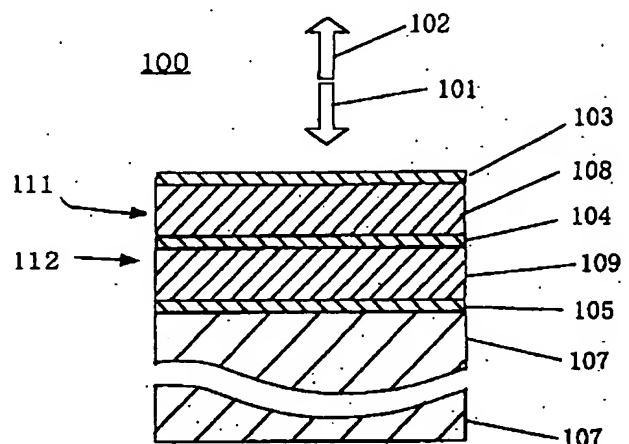
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光分散補償素子

(57)【要約】

【課題】 光ファイバを使用する光通信システムにおいて、通信ビットレート的高速化、通信距離の長距離化によって、従来の波長分散補償方法では正確な通信ができなくなり、3次以上の波長分散補償が必要になると予測されている。しかし、3次の波長分散補償の十分な対策は提案されていない。

【解決手段】 屈折率の高い層(層H)と低い層(層L)とを組合わせて、第1の反射層、第1の光透過層、第2の反射層、第2の光透過層、第3の反射層の順に形成した多層膜を用いて光分散補償素子を作成して3次分散を完全に補償することができた。そして、前記多層膜を入射面内方向において膜厚が変化するように構成したところ、種々の入射光に対して3次の分散補償ができる光分散補償素子を作成することができた。挿入損失は0.5dB以下にすることができた。



100:多層膜

101:入射光の方向を示す矢印

102:出射光の方向を示す矢印

103,104,105:反射層

108,109:光透過層

107:基板(BK-7ガラス)

111,112:キャビティ

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光ファイバを通信伝送路に用いた通信システムに使用して波長分散（以下、単に、分散ともいう）を補償することができる光分散補償素子であつて、光学的性質が異なる積層膜を少なくとも 5 種類（すなわち、光の反射率や膜厚などの光学的な性質の異なる積層膜を少なくとも 5 層）有する多層膜を有し、前記多層膜が光の反射率が互いに異なる少なくとも 2 種類の反射層を含む少なくとも 3 種類の反射層を有するとともに、前記 3 種類の反射層の他に少なくとも 2 つの光透過層を有し、前記 3 種類の反射層の各 1 層と前記 2 つの光透過層の各 1 層とが交互に配置されており、前記多層膜が、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、第 1 の反射層である第 1 層、第 1 の光透過層である第 2 層、第 2 の反射層である第 3 層、第 2 の光透過層である第 4 層、第 3 の反射層である第 5 層から構成されており、入射光の中心波長を λ として、前記第 1 ～ 第 5 層において、入射光の中心波長 λ の光に対する光路長（以下、単に、光路長ともいう）として考えたときの膜厚（以下、単に、膜厚あるいは膜の厚みともいう）が、 $\lambda/4$ の整数倍 $\pm 1\%$ の範囲の値（以下、 $\lambda/4$ の整数倍、あるいは、 $\lambda/4$ のほぼ整数倍ともいう）の膜厚であり、かつ、前記多層膜が、膜厚が λ の $1/4$ 倍（以下、 λ の $1/4$ 倍 $\pm 1\%$ の膜厚の意味で λ の $1/4$ 倍の膜厚ともいう）で屈折率が高い方の層（以下、層 H ともいう）と膜厚が λ の $1/4$ 倍で屈折率が低い方の層（以下、層 L ともいう）を組み合わせた層の複数組で構成されており、前記 5 層の積層膜すなわち前記第 1 ～ 第 5 層が、前記多層膜の厚み方向の一方の側から順に、層 H、層 L の順に各 1 層ずつ組み合わせた層（以下、HL の層ともいう）を 2 セット（層 H 1 層と層 L 1 層とを組み合わせた層を HL の層 1 セットと称する。以下同様）積層して構成される第 1 層、層 H と層 H を組み合わせた層（すなわち、層 H を 2 層重ねて形成した層。以下、HH の層ともいう）を 1 4 セット積層して構成される第 2 層、層 L を 1 層と HL の層を 6 セットとを積層して構成される第 3 層、HH の層を 2 4 セット積層して構成される第 4 層、層 L を 1 層と HL の層を 1 3 セットとを積層して構成される第 5 層でそれぞれ形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の光分散補償素子において、前記 HH の層を 1 4 セット積層して形成されている第 2 層の代わりに、前記第 2 層が、請求項 1 に記載と同じ方向の膜の厚み方向の一方の側から順に、HH の層を 3 セット、層 L と層 L を組み合わせた層（すなわち、層 L を 2 層重ねて形成した層。以下、LL の層ともいう）を 3 セット、HH の層を 3 セット、LL の層を 3 セット、HH の層を 2 セット、LL の層を 1 セット、HH の層を 1 セットをこの順に積層して構成される積層膜で形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 3】 請求項 1 または 2 に記載の光分散補償素

子において、前記 HH の層を 2 4 セット積層して形成されている第 4 層の代わりに、前記第 4 層が、請求項 1 に記載と同じ方向の膜の厚み方向の一方の側から順に、HH の層を 3 セット、LL の層を 3 セット、HH の層を 3 セット、LL の層を 3 セット、HH の層を 3 セット、LL の層を 3 セット、HH の層を 2 セット、LL の層を 1 セット、HH の層を 1 セットをこの順に積層して構成される積層膜で形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 4】 光ファイバを通信伝送路に用いた通信システムに使用して波長分散（以下、単に、分散ともいう）を補償することができる光分散補償素子であつて、光学的性質が異なる積層膜を少なくとも 5 種類（すなわち、光の反射率や膜厚などの光学的な性質の異なる積層膜を少なくとも 5 層）有する多層膜を有し、前記多層膜が光の反射率が互いに異なる少なくとも 2 種類の反射層を含む少なくとも 3 種類の反射層を有するとともに、前記 3 種類の反射層の他に少なくとも 2 つの光透過層を有し、前記 3 種類の反射層の各 1 層と前記 2 つの光透過層の各 1 層とが交互に配置されており、前記多層膜が、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、第 1 の反射層である第 1 層、第 1 の光透過層である第 2 層、第 2 の反射層である第 3 層、第 2 の光透過層である第 4 層、第 3 の反射層である第 5 層から構成されており、入射光の中心波長を λ として、前記第 1 ～ 第 5 層において、入射光の中心波長 λ の光に対する光路長（以下、単に、光路長ともいう）として考えたときの膜厚（以下、単に、膜厚あるいは膜の厚みともいう）が、 $\lambda/4$ の整数倍 $\pm 0.5\%$ の範囲の値（以下、 $\lambda/4$ の整数倍、あるいは、 $\lambda/4$ のほぼ整数倍ともいう）の膜厚であり、かつ、前記多層膜が、膜厚が λ の $1/4$ 倍（以下、 λ の $1/4$ 倍 $\pm 0.5\%$ の膜厚の意味で λ の $1/4$ 倍の膜厚ともいう）で屈折率が高い方の層（以下、層 H ともいう）と膜厚が λ の $1/4$ 倍で屈折率が低い方の層（以下、層 L ともいう）を組み合わせた層の複数組で構成されており、前記 5 層の積層膜すなわち前記第 1 ～ 第 5 層が、前記多層膜の厚み方向の一方の側から順に、層 L、層 H の順に各 1 層ずつ組み合わせた層（以下、LH の層ともいう）を 4 セット積層して構成される第 1 層、層 L と層 L を組み合わせた層（すなわち、層 L を 2 層重ねて形成した層。以下、LL の層ともいう）を 9 セット積層して構成される第 2 層、層 H を 1 層と LH の層を 6 セットとを積層して構成される第 3 層、LL の層を 3 5 セット積層して構成される第 4 層、層 H を 1 層と LH の層を 1 3 セットとを積層して構成される第 5 層でそれぞれ形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 5】 請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記層 H が Si、Ge、TiO₂、Ta₂O₅、Nb₂O₅ のいずれかから成る層で形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 6】 請求項 1～5 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記層 L が、層 H に使用されている材質よりも屈折率の低い材質を用いて形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 7】 請求項 1～6 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、層 L が SiO_2 から成る層で形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 8】 光ファイバを通信伝送路に用いた通信システムに使用して波長分散（以下、単に、分散ともいう）を補償することができる光分散補償素子であって、
10 光学的性質が異なる積層膜を少なくとも 5 種類（すなわち、光の反射率や膜厚などの光学的な性質の異なる積層膜を少なくとも 5 層）有する多層膜を有し、前記多層膜が光の反射率が互いに異なる少なくとも 2 種類の反射層を含む少なくとも 3 種類の反射層を有するとともに、前記 3 種類の反射層の他に少なくとも 2 つの光透過層を有し、前記 3 種類の反射層の各 1 層と前記 2 つの光透過層の各 1 層とが交互に配置されており、入射光の中心波長を λ として、前記多層膜の 3 種類の反射層の波長 λ の光に対する反射率が、前記多層膜の厚み方向の一方の側から順に、あるいは入射光の光路に沿って、その一方の側から順に（以下、単に、膜の厚み方向の一方の側から順にともいう）、それぞれ 60～77%、96～99.8%、98%以上であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 9】 請求項 1～8 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記多層膜の前記第 1 層、第 3 層、第 5 層の前記波長 λ の光に対する反射率（以下、波長 λ の光に対する反射率を、単に、反射率ともいう）をそれぞれ R_1 、 R_3 、 R_5 とするとき、 $R_1 < R_3 < R_5$ であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 10】 請求項 1～8 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記多層膜の前記第 1 層、第 3 層、第 5 層の反射率 R_1 、 R_3 、 R_5 が、 $R_1 \leq R_3 \leq R_5$ であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 11】 請求項 1～10 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、少なくとも 1 つの前記光透過層の膜厚が、前記多層膜の光の入射面に平行な断面における面内方向（以下、入射面内方向ともいう）において変化していることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 12】 請求項 11 に記載の光分散補償素子において、前記入射面内方向において膜厚が変化している光透過層が 2 層あることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 13】 請求項 11 または 12 に記載の光分散補償素子において、膜厚が前記入射面内方向において変化している反射層が少なくとも 1 層あることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 14】 請求項 11 または 12 に記載の光分散補償素子において、膜厚が前記入射面内方向において変化している反射層が 2 層であることを特徴とする光分散

補償素子。

【請求項 15】 請求項 11 または 12 に記載の光分散補償素子において、膜厚が前記入射面内方向において変化している反射層が 3 層であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 16】 請求項 11～15 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記膜厚が変化している当該反射層、当該光透過層の少なくとも 1 つの層の入射面内方向における膜厚の変化が、前記多層膜の幅もしくは長さもしくは径方向など、その膜厚が変化している方向の少なくとも 1 つの方向において、単調増加もしくは単調減少であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 17】 請求項 11～15 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記膜厚が変化している当該反射層、当該光透過層の少なくとも 1 つの層の入射面内方向における膜厚の変化が、前記多層膜の幅もしくは長さもしくは径方向など、その膜厚が変化している方向の少なくとも 1 つの方向において、単調増加でも単調減少でもなく、少なくとも 1 つの膜厚の極値を有することを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 18】 請求項 11～17 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記膜厚が変化している当該反射層、当該光透過層の少なくとも 1 つの層の入射面内方向における膜厚の変化している方向（以下、膜厚変化の方向ともいう）が 1 次元であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 19】 請求項 11～17 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記膜厚が変化している当該反射層、当該光透過層の少なくとも 1 つの層の入射面内方向における膜厚変化の方向が 2 次元であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 20】 請求項 12～19 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記膜厚が変化している 2 層の光透過層におけるそれぞれの膜厚変化の方向のなす角が +30 度～+150 度または -30 度～-150 度の範囲であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 21】 請求項 11～20 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記膜厚が変化している少なくとも 1 層の光透過層の膜厚変化の方向と同じ膜厚変化の方向を有する反射層が、少なくとも 1 層存在することを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 22】 請求項 21 に記載の光分散補償素子において、前記膜厚の変化する光透過層が 2 層であり、各光透過層の膜厚変化の方向とほぼ同じ膜厚変化の方向を有する反射層が該光透過層それぞれに対応して少なくとも各 1 層あることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 23】 請求項 1～22 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、光分散補償対象波長と光分散補償量を変化させることができることを特徴とする光分散補償素子。

10

20

30

40

50

【請求項 24】 請求項 1～23 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記反射層および光透過層における入射光の入射位置を変えることによって、群速度遅延時間－波長特性曲線における群速度遅延時間の極値を与える波長（以下、極値波長ともいう）が比較的大きく変化する方向（以下、波長調整方向ともいう）と、前記極値波長はあまり大きく変化させずに群速度遅延時間－波長特性曲線の形が変化する（すなわち、調整することができる）方向（以下、曲線調整方向ともいう）とがあり、前記光分散補償対象波長の代表波長（たとえば、中心波長あるいは補償帯域の中央の波長）が前記極値波長であり、前記光分散補償量が群速度遅延時間－波長特性曲線から得られる遅延時間であり、該波長調整方向と該曲線調整方向とのなす角が $+30^\circ \sim +150^\circ$ あるいは、 $-30^\circ \sim -150^\circ$ であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 25】 請求項 24 に記載の光分散補償素子において、前記波長調整方向と前記曲線調整方向がほぼ直交していることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 26】 請求項 24 または 25 に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償対象波長と前記光分散補償量の少なくとも一方の調整手段が手動であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 27】 請求項 24 または 25 に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償対象波長と前記光分散補償量の少なくとも一方の調整手段が、プリズム・ニッソリメータ・光導波路などを利用した光学的手段であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 28】 請求項 24 または 25 に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償対象波長と前記光分散補償量の少なくとも一方の調整手段が電気的手段であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 29】 請求項 28 に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償対象波長と前記光分散補償量の少なくとも一方の調整手段がステップモータか、連続的に位置変化が可能なモータによる手段であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 30】 請求項 29 に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償対象波長と前記光分散補償量の少なくとも一方の調整手段の前記モータが圧電モータであることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 31】 請求項 1～30 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記多層膜が、少なくとも一対の反射層と、前記少なくとも一対の反射層にはさまれた 1 つの光透過層とで構成されるキャビティを少なくとも 2 つ有することを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 32】 請求項 31 に記載の光分散補償素子において、前記 2 つの各キャビティの共振波長、あるいは、前記光通信に使用する波長帯域での FSR (Free Spectral Range) が、前記入射面内

方向において変化していることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 33】 請求項 31 または 32 に記載の光分散補償素子において、前記多層膜の入射面内方向における同一位置に置いて、前記 2 つのキャビティの共振波長あるいは前記光通信に使用する波長帯域での FSR (Free Spectral Range) が異なることを特徴とする光分散補償素子。

10 【請求項 34】 請求項 1～33 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記入射光の中心波長 λ が $1460\text{ nm} \sim 1640\text{ nm}$ の範囲における選択された領域の波長であることを特徴とする光分散補償素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、伝送路に光ファイバを用いた光通信において生ずる 3 次以上の波長分散（以下、単に、分散ともいう）を補償可能な素子（以下、3 次の分散を変えることができる素子、あるいは、3 次分散補償素子ともいう。また、2 次の分散を補償可能な素子についても、これと同様に、2 次の分散を変えることができる素子、あるいは、2 次分散補償素子ともいう。）を有する光分散補償素子に関する。本発明の光分散補償素子は、前記の 3 次分散補償素子だけの場合もあり、また、後述の入射面内における入射光の入射位置を変化させる手段を含む場合もあり、また、2 次の分散補償も可能なように構成されている場合もあり、実装されている場合もあり、実装されていないいわゆるチップ状やウェハー状の場合もある。本発明の光分散補償素子は、これらのすべての形態を含んでおり、使用や販売などの目的に応じて、種々の形態をとることができるものである。

【0002】本発明では、2 次の分散補償とは「図 5

(A) を用いて後述する波長－時間特性曲線の分散の傾きを補償すること」を意味し、3 次の分散補償とは「図 5 (A) を用いて後述する波長－時間特性曲線の曲がりの補償」を意味する。

【0003】

【従来の技術】通信伝送路に光ファイバを用いた光通信においては、利用技術の進展および利用範囲の拡大とともに、通信伝送路の長距離化や通信ビットレートの高速度化が求められている。このような環境下では、光ファイバを伝送するときに生じる分散が大きな問題となり、分散の補償が種々試みられている。現在、2 次の分散が大きな問題となり、その補償が種々提案され、そのうちのいくつかの提案が効果をあげている。

【0004】しかし、光通信に対する要求が高度になるにつれて、送信中の 2 次の分散の補償だけでは不十分になり、3 次の分散の補償が課題になりつつある。

【0005】以下、図 5 および図 6 を使用して、従来の 2 次の分散補償方法を説明する。

【0006】図6は、シングルモード光ファイバ（以下、SMFとも称す）と分散補償ファイバ、および分散シフトファイバ（以下、DSFとも称す）の分散-波長特性を説明する図である。図6において、符号601はSMFの分散-波長特性を示すグラフ、602は分散補償ファイバの分散-波長特性を示すグラフ、603はDSFの分散-波長特性を示すグラフで、縦軸を分散、横軸を波長にとったグラフである。

【0007】図6で明かなように、SMFでは、ファイバに入力する光の波長が1.3μmから長くなるにつれて分散は増大し、分散補償ファイバでは、入力光の波長が1.3μmから1.8μmまで長くなるにつれて分散は減少する。また、DSFでは、入力光の波長が1.2μmから1.55μm付近まで長くなるにつれて分散は小さくなり、波長が1.55μm付近から1.8μmへと長くなるにつれて分散が増大する。そして、DSFでは、従来の2.5Gbps（毎秒2.5ギガビット）程度の通信ビットレートの光通信においては、入力光の波長が1.55μm付近では、分散は光通信上支障を生じない。

【0008】図5は、主として2次の分散の補償方法を説明する図であり、(A)は波長-時間特性と光強度-時間特性を、(B)はSMFと分散補償ファイバを用いて2次の分散補償を行った伝送路の例を、(C)はSMFだけで構成した伝送路を説明する図である。

【0009】図5において、符号501と511は伝送路に入力する前の信号光の特性を示すグラフを、530はSMF 531で構成された伝送路を、502と512は、グラフ501と511で示した特性の信号光が伝送路530を伝送されて伝送路530から出力された信号光の特性を示すグラフを、520は分散補償ファイバ521とSMF 522から構成された伝送路を、503と513は、グラフ501と511で示した特性の信号光が伝送路520を伝送されて伝送路520から出力された信号光の特性を示すグラフである。符号504および514は、グラフ501と511で示した特性の信号光が伝送路520を伝送されて伝送路520から出力されて後、本発明によって、後述の望ましい3次分散補償を施されたときの信号光の特性を示すグラフであり、グラフ501および511とほとんど一致している。また、グラフ501、502、503、504はそれぞれ縦軸を波長、横軸を時間（または時刻）にとったグラフであり、グラフ511、512、513、514はそれぞれ縦軸を光強度、横軸を時間（または時刻）にとったグラフである。なお、符号524と534は送信器、525と535は受信器である。

【0010】従来のSMFは、前述のように、信号光の波長が1.3μmから長くなるにつれて分散が増加するため、高速通信や長距離伝送の際には、分散による群速度遅延を生じる。SMFで構成された伝送路530で

は、信号光は伝送中に長波長側が短波長側に比べて大きく遅延して、グラフ502と512に示すようになる。このように変化した信号光は、たとえば高速通信・長距離伝送においては、前後の信号光と重なって正確な信号として受信できない場合がある。

【0011】このような問題を解決するため、従来は、たとえば、図5(B)に示すように分散補償ファイバを用いて分散を補償（以下、補正ともいう）している。従来の分散補償ファイバは、波長が1.3μmから長くなるにつれて分散が増加するというSMFの問題点を解決するため、前述のように、波長が1.3μmから長くなるにつれて分散が減少するように作られている。また、分散補償ファイバは、たとえば、図5の伝送路520で示すように、SMF 522に分散補償ファイバ521を接続して用いることができる。上記伝送路520では、信号光は、SMF 522では長波長側が短波長側に比べて大きく遅延し、分散補償ファイバ521では短波長側が長波長側に比べて大きく遅延することにより、グラフ503と513に示すように、グラフ502と512に示す変化よりも変化量を小さく抑えることができる。

【0012】しかし、分散補償ファイバを使用した上記従来の2次の波長分散の補償方法では、伝送路を伝送した信号光の波長分散を、伝送路に入力する前の信号光の状態、すなわち、グラフ501の形までには分散補償することはできず、グラフ503の形まで補償するのが限界である。グラフ503に示すように、分散補償ファイバを使用した従来の2次の波長分散の補償方法では、信号光の中心波長の光が短波長側の光および長波長側の光に比べて遅延せず、信号光の短波長側および長波長側の成分のみが遅延する。そして、グラフ513に示すようにグラフの一部にリップルが生じることがある。

【0013】これらの現象は、光通信の伝送距離の長距離化と通信速度の高速化のニーズが高まるに従い、正確な信号受信ができなくなるなどの大きな問題となりつつある。たとえば、通信ビットレートが20Gbps（毎秒20ギガビット）以上の高速通信においては、これらの現象がかなり心配されており、特に、通信ビットレートが40Gbps以上の通信においては極めて重大な課題として心配されている。そして、このような高速通信においては、従来の光ファイバ通信システムを使用することは困難と考えられており、たとえば、光ファイバ自体の材質も変える必要が叫ばれるなど、システム構築の経済的な観点からも重大問題となっている。

【0014】

【発明が解決しようとする課題】このような分散補償を行うには、2次の分散補償だけでは困難であり、3次以上の分散補償が必要になる。

【0015】従来、波長が1.55μm付近の光に対して2次の分散が少なくなるような光ファイバ（以下、光ファイバのことを、単に、ファイバともいう）としてD

SFがあるが、このファイバでは、図5、図6の特性からも明らかのように本発明の課題とする3次の分散補償はできない。

【0016】光通信の高速通信化、長距離通信化を実現するにあたり、3次の分散は大きな問題として次第に認識され、その補償が重要な課題となりつつある。3次の分散の補償問題を解決すべく、多くの試みが行なわれているが、従来の課題を十分に解決することができる3次分散補償素子や補償方法はまだ実用化されていない。

【0017】前記の3次分散の補償に用いる光分散補償素子および3次の分散補償を行うことができる光学装置を構成する主要な素子である3次分散補償素子の一例として本発明者らが提案した誘電体多層膜などは、3次の分散補償に成功し、従来の光通信技術を大きく前進させることが出来た。しかし、多チャンネルの光通信における3次の分散の補償を行うには、群速度遅延の波長帯域および群速度遅延の遅延時間を調整可能な3次分散補償素子の必要性が叫ばれている。特に、各チャンネルの波長にも適する3次以上の分散補償素子を安価に実用化する1つの方法として、波長可変な（すなわち、分散補償対象波長を選択可能な）分散補償素子を実現する必要がある。

【0018】本発明はこのような点に鑑みてなされたものであり、本発明の目的は、従来実用化することが出来なかった優れた群速度遅延時間-波長特性を有する光分散補償素子を信頼性が高く、量産で、安価に提供するとともに、さらに、群速度遅延の波長帯域および遅延時間の調整機能を有する多層膜素子を用いた、3次以上の分散補償を可能にする光分散補償素子を提供することにもある。

【0019】

【課題を解決するための手段】本発明の目的の達成を図るため、本発明の光分散補償素子は、いくつかの実施の形態を有しており、それぞれ特徴を有している。

【0020】本発明の光分散補償素子を製造し易く、安価に提供するにあたり、本発明の光分散補償素子の一例においては、前記多層膜を、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、第1の反射層である第1層、第1の光透過層である第2層、第2の反射層である第3層、第2の光透過層である第4層、第3の反射層である第5層から構成し、前記第1～第5層において、入射光の中心波長を λ として、入射光の中心波長 λ の光に対する光路長（以下、単に、光路長ともいう）として考えたときの膜厚（以下、単に、膜厚あるいは膜の厚みともいう）が、 $\lambda/4$ の整数倍 $\pm 1\%$ の範囲の値（以下、 $\lambda/4$ の整数倍、あるいは、 $\lambda/4$ のほぼ整数倍ともいう）の膜厚であり、かつ、前記多層膜が、膜厚が λ の $1/4$ 倍（以下、 λ の $1/4$ 倍 $\pm 1\%$ の膜厚の意味で λ の $1/4$ 倍の膜厚ともいう。）で屈折率が高い方の層（以下、層Hともいう）と膜厚が λ の $1/4$ 倍で屈折率が低い方の層（以下、層

Lともいう）を組み合わせた層の複数組で構成されており、前記5層の積層膜すなわち前記第1～第5層が、前記多層膜の厚み方向の一方の側から順に、層H、層Lの順に各1層ずつ組み合わせた層（以下、HLの層ともいう）を2セット（層H1層と層L1層を組み合わせた層をHLの層1セットと称する、以下同様）積層して構成される第1層、層Hと層Hを組み合わせた層（すなわち、層Hを2層重ねて形成した層。以下、HHの層ともいう）を14セット積層して構成される第2層、層Lを1層とHLの層を6セットとを積層して構成される第3層、HHの層を24セット積層して構成される第4層、層Lを1層とHLの層を13セットとを積層して構成される第5層でそれぞれ形成されていることを特徴としている。

【0021】さらに、本発明の効果的な光分散補償素子の他の例においては、前記HHの層を14セット積層して形成されている第2層の代わりに、前記第2層が、前記第2層の場合と同じ方向である膜の厚み方向の一方の側と同じ側から順に、HHの層を3セット、層Lと層Lを組み合わせた層（以下、LLの層ともいう）を3セット、HHの層を3セット、LLの層を3セット、HHの層を2セット、LLの層を1セット、HHの層を1セットをこの順に積層して構成される積層膜で形成されていることを特徴としている。

【0022】そして、本発明の効果的な光分散補償素子の他の例においては、前記HHの層を24セット積層して形成されている第4層の代わりに、前記第4層が、前記第4層の場合と同じ方向である膜の厚み方向の一方の側から順に、HHの層を3セット、LLの層を3セット、HHの層を3セット、LLの層を3セット、HHの層を3セット、LLの層を3セット、HHの層を2セット、LLの層を1セット、HHの層を1セットをこの順に積層して構成される積層膜で形成されていることを特徴としている。

【0023】そして、本発明の光分散補償素子の別の例においては、前記多層膜が、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、第1の反射層である第1層、第1の光透過層である第2層、第2の反射層である第3層、第2の光透過層である第4層、第3の反射層である第5層から構成されており、前記多層膜が、前記多層膜の厚み方向の一方の側から順に、層L、層Hの順に各1層ずつ組み合わせた層（以下、LHの層ともいう）を4セット積層して構成される第1層、LLの層を9セット積層して構成される第2層、層Hを1層とLHの層を6セットとを積層して構成される第3層、LLの層を35セット積層して構成される第4層、層Hを1層とLHの層を13セットとを積層して構成される第5層でそれぞれ形成されていることを特徴としている。

【0024】そして、本発明の実用的な光分散補償素子

においては、前記層HがSi、Ge、TiO₂、Ta₂O₅、Nb₂O₅のいずれかから成る層で形成されていることを特徴としており、前記層Lが、層Hに使用されている材質よりも屈折率の低い材質を用いて形成されていることを特徴としている。そして、代表的な例として、層LがSiO₂から成る層で形成されていることを特徴としている。

【0025】本発明の光分散補償素子は、光学的性質が異なる積層膜を少なくとも5種類（すなわち、光の反射率や膜厚などの光学的な性質の異なる積層膜を少なくとも5層）有する多層膜を有し、前記多層膜が光の反射率が互いに異なる少なくとも2種類の反射層を含む少なくとも3種類の反射層を有するとともに、前記3種類の反射層の他に少なくとも2つの光透過層を有し、前記3種類の反射層の各1層と前記2つの光透過層の各1層とが交互に配置されており、入射光の中心波長を λ として、前記多層膜の3種類の反射層の波長 λ の光に対する反射率が、前記多層膜の膜の厚み方向の一方の側から順に、それぞれ60～77%、96～99.8%、98%以上であることを特徴としている。

【0026】そして、本発明の光分散補償素子においては、前記多層膜の前記第1層、第3層、第5層の前記波長 λ の光に対する反射率（以下、入射光の中心波長 λ の光に対する反射率を、単に、反射率ともいう）をそれぞれR1、R3、R5とすると、 $R1 < R3 < R5$ であることを特徴としている。そして、これらの反射率の関係は $R1 \leq R3 \leq R5$ であっても、本発明による良好な光分散補償を行うことができる。

【0027】そして本発明の効果大なる光分散補償素子においては、量産性、信頼性、コストなどの観点から、少なくとも1層の前記光透過層の膜厚が、前記多層膜の光の入射面に平行な面内方向（以下、入射面内方向ともいう）において変化しているように、すなわち、入射面内方向の各位置において膜厚が異なるように前記光透過層が形成されていることを特徴としている。

【0028】そして、本発明の光分散補償素子においては、前記入射面内方向において膜厚が変化している光透過層が2層あるように構成することができることを特徴としている。

【0029】また、本発明の光分散補償素子の例においては、膜厚が前記入射面内方向において変化している反射層が少なくとも1層あるように構成することができることを特徴としている。

【0030】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、前記膜厚が変化している当該反射層または当該光透過層の少なくとも1つの層の入射面内方向における膜厚の変化が、前記多層膜の幅もしくは長さもしくは径方向など、その膜厚が変化している方向の少なくとも1つの方向において、単調増加もしくは単調減少であることを特徴としている。

【0031】また、本発明の光分散補償素子の例においては、前記膜厚が変化している当該反射層または当該光透過層の少なくとも1つの層の入射面内方向における膜厚の変化が、前記多層膜の幅もしくは長さもしくは径方向など、その膜厚が変化している方向の少なくとも1つの方向において、単調増加でも単調減少でもなく、少なくとも1つの膜厚の極値を有することを特徴としている。

【0032】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、前記膜厚が変化している当該反射層または当該光透過層の少なくとも1つの層の入射面内方向における膜厚の変化している方向（以下、膜厚変化の方向ともいう）が1次元であることを特徴としている。

【0033】本発明の光分散補償素子の例においては、前記膜厚が変化している光透過層が2層あり、入射面内方向における素子全体としての膜厚変化の方向が2次元であることを特徴としている。

【0034】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、前記膜厚が変化している2層の光透過層におけるそれぞれの膜厚変化の方向のなす角が+30度～+150度または-30度～-150度の範囲であることを特徴としている。

【0035】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、前記膜厚が変化している少なくとも1層の光透過層の膜厚変化の方向と同じ膜厚変化の方向を有する反射層が、少なくとも1層存在することを特徴としている。

【0036】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、前記膜厚の変化する光透過層が2層であり、各光透過層の膜厚変化の方向とはほぼ同じ膜厚変化の方向を有する反射層が当該光透過層それぞれに対応して少なくとも各1層あることを特徴としている。

【0037】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、光分散補償対象波長と光分散補償量を変化させることができることを特徴としている。

【0038】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、前記反射層および光透過層における入射光の入射位置を変えることによって、群速度遅延時間-波長特性曲線における群速度遅延時間の極値を与える波長（以下、極値波長ともいう）が比較的大きく変化する方向

（以下、波長調整方向ともいう）と、前記極値波長はあまり大きく変化させずに群速度遅延時間-波長特性曲線の形が変化する（すなわち、調整することができる）方向（以下、曲線調整方向ともいう）があり、前記光分散補償対象波長の代表波長（中心波長あるいは補償帯域の中央の波長）を前記極値波長とすることができ、前記光分散補償量は群速度遅延時間-波長特性曲線から得られる遅延時間であり、該波長調整方向と該曲線調整方向とのなす角が+30度～+150度あるいは、-30度～-150度であることを特徴としている。その典型的な

1つの例では、前記波長調整方向と前記曲線調整方向がほぼ直交していることを特徴としている。

【0039】そして、本発明の光分散補償素子においては、その実用上の観点から前記光分散補償対象波長と前記光分散補償量の少なくとも一方を調整する手段があり、その手段が手動、あるいは、プリズムや光導波路などを利用した光学的手段、あるいは、電気的手段であることを特徴としている。

【0040】そして、前記調整する手段には入射光の位置を移動する方法と光分散補償素子を構成している多層膜を移動させる方法があり、その調整手段が電気的手段の場合、その調整手段としてステップモータ、連続的に位置変化が可能なモータ、圧電モータなどがある。

【0041】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、前記多層膜が、少なくとも一対の反射層と、前記少なくとも一対の反射層にはさまれた1つの光透過層とで構成される光学のキャビティ（以下、単に、キャビティともいう）を少なくとも2つ有することを特徴としている。

【0042】そして、本発明の光分散補償素子の例においては、前記2つの各キャビティの共振波長あるいは前記光通信に使用する波長帯域でのFSR (Free Spectral Range) が、前記入射面内方向において変化していることを特徴としている。

【0043】さらに、本発明の光分散補償素子においては、前記多層膜の入射面内方向における同一位置に置いて、前記2つのキャビティをはさむ前記反射層間の間隔が異なることを特徴としている。

【0044】そして、本発明の光分散補償素子における、前記入射光の中心波長 λ が1500nm～1640nmの範囲における波長であることを特徴としている。

【0045】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。なお、説明に用いる各図は本発明を理解できる程度に各構成成分の寸法、形状、配置関係などを概略的に示してある。そして本発明の説明の都合上、部分的に拡大率を変えて図示する場合もあり、本発明の説明に用いる図は、必ずしも実施例などの実物や記述と相似形でない場合もある。また、各図において、同様な構成成分については同一の番号を付けて示し、重複する説明を省略することもある。

【0046】図1は本発明の3次分散補償素子の例として用いる多層膜の断面をモデル的に説明する図である。図1において、符号100は本発明の光分散補償素子の例としての多層膜、101は入射光の方向を示す矢印、102は出射光の方向を示す矢印、103、104は反射率が100%未満の反射層（以下、反射膜ともいう）、105は反射率が98～100%の反射層、108、109は光透過層、111、112はキャビティである。また、符号107は基板で、たとえば、BK-7

ガラスを使用している。

【0047】図1の各反射層103、104、105の反射率 $R(103)$ 、 $R(104)$ 、 $R(105)$ は、 $R(103) \leq R(104) \leq R(105)$ の関係にある。そして、各層の反射率を互いに異なるように設定することが量産上好ましい。すなわち、入射光が入射する側から多層膜の厚み方向に向かって、入射光の中心波長 λ に対する各反射層の反射率が次第に大きくなるように形成する。そして、各反射層の前記波長 λ の光に対する反射率を、 $60\% \leq R(103) \leq 77\%$ 、 $96\% \leq R(104) \leq 99.8\%$ 、 $98\% \leq R(105)$ の範囲にとって、前記 $R(103)$ 、 $R(104)$ 、 $R(105)$ の関係を満たすように構成することにより、後述の図3、図4に示すような群速度遅延時間一波長特性曲線を得ることができる。そして、 $R(103) < R(104) < R(105)$ にすることがより好ましく、 $R(105)$ を100%に近づけるか100%にすることがより好ましい。

【0048】そして、本発明の光分散補償素子をより製造しやすくするために、隣り合う各反射層間の光路長として考えたときの間隔がそれぞれ異なるように各反射層の形成条件を選ぶことが好ましく、各反射層の反射率の設計精度をゆるめることができ、膜厚が波長 λ の4分の1の単位膜の組み合わせ（ $\lambda/4$ の整数倍の膜厚の膜）で本発明の3次分散補償素子に用いられる多層膜を形成することができ、信頼性が高く、量産性が優れた3次分散補償素子を安価に提供することができる。

【0049】なお、前記多層膜の膜厚が波長 λ の4分の1であると記載したが、これは、前記の如く、量産における膜の形成で許容される誤差の範囲内において $\lambda/4$ という意味であり、具体的には、 $\lambda/4 \pm 1\%$ において本発明でいう $\lambda/4$ の膜厚を意味しており、この範囲において本発明は特に大きな効果を発する。そこで、本発明ではこの範囲の膜厚を $\lambda/4$ の厚みということにした。特に、上記単位膜の厚みを $\lambda/4 \pm 0.5\%$ （この場合の $\lambda/4$ は誤差無しの $\lambda/4$ の意味）にすることにより、量産性を損なわずに、バラツキが少なく、信頼性の高い多層膜を形成することができ、図3、図4で後述するような光分散補償素子を安価に提供することができる。

【0050】図2は、図1の多層膜100の後述する入射面220の面内方向において、前記多層膜100の膜厚を変化させた例を説明する図である。

【0051】図2において、符号200は本発明の光分散補償素子の一例としての多層膜、201は第1の反射層、202は第2の反射層、203は第3の反射層、205は基板、206は第1の光透過層、207は第2の光透過層、211は第1のキャビティ、212は第2のキャビティ、220は光入射面、230は入射光の方向を示す矢印、240は出射光の方向を示す矢印、250

は第1の膜厚変化方向を示す矢印、260は第2の膜厚変化方向を示す矢印である。

【0052】図2において、たとえば、BK-7ガラスなどから成る基板205の上に、第3の反射層203、第2の光透過層207、第2の反射層202、第1の光透過層206、第1の反射層201が、順次形成されている。

【0053】第1の光透過層206の厚みが矢印250で示す方向に変化する（図の右から左の方向に次第に厚くなっている）ように、そして、第2の光透過層207の厚みが矢印260で示す方向に変化する（図の手前から向こう側に次第に厚くなっている）ように、前記多層膜を形成する。第1から第3の反射層の厚みは、第1および第2のキャビティの共振波長が一致したときの波長が入射光の中心波長 λ になったときに、第1、第2、第3の各反射層の反射率が、前記R(103)、R(104)、R(105)の条件を満たすような膜厚に形成する。

【0054】図3は、本発明の光分散補償素子の例としての多層膜（以下、光分散補償素子ともいう）200の入射面220において、図2の矢印230の方向から入射光を入射し、矢印240の方向に出射光を得るようにし、入射光の入射位置を後述の矢印270あるいは271の方向に移動した時の、群速度遅延時間-波長特性曲線の変化する様子を説明するものである。

【0055】図3(A)は本発明の光分散補償素子としての多層膜200の前記入射面220内における入射光の入射位置を説明する図で、符号270、271は入射光の入射位置を移動させる方向を示す矢印を示す。

【0056】図3(B)は、入射位置280~282に中心波長 λ の入射光を入射させたときの群速度遅延時間-波長特性曲線を示し、縦軸は群速度遅延時間、横軸は波長である。

【0057】反射層201~203および光透過層206と207の各矢印250と260で示す方向に膜厚を変化させる条件を適切に選ぶことによって、前記入射光の入射面220における入射位置を矢印270で示す方向（すなわち、波長調整方向）に移動させたとき、群速度遅延時間-波長特性曲線の形状をほぼ同様の形に維持しつつ、群速度遅延時間-波長特性曲線の帯域中心波長 λ_0 （たとえば、図3(B)のほぼ左右対称の形状の群速度遅延時間-波長特性曲線2801における極値を与える波長）が変化し、そして、その位置から矢印271で示す方向（すなわち、曲線調整方向）に前記入射位置を移動させたとき、前記波長 λ_0 はほとんど変わらずに、群速度遅延時間-波長特性曲線の形状を、図3

(B)の曲線2811、2812のように変化させることができる。

【0058】曲線2801~2812における帯域中心波長 λ_0 は、分散補償の目的によって、たとえば図3

(B)のグラフの適切な波長のところに設定するが、たとえば、図3(B)に図示の曲線の波長の範囲のほぼ中央値にとってもよく、分散補償の目的に応じて適宜定めても良い。また、曲線2801~2812の間のそれぞれの極値波長など曲線の各特徴点の波長の対応関係をあらかじめ調べておくことなどはここに記載しなくても当然のことである。

【0059】このようにして、たとえば、まず、分散補償すべき入射光の中心波長 λ に該当する帯域中心波長 λ_0 を一致させるように、入射光の入射位置を矢印270の方向に移動して決め、分散補償すべき補償の内容、すなわち、入射光の分散状況に適合して、分散補償に用いる群速度遅延時間-波長特性曲線の形状を、たとえば図3(B)の各曲線などから選択し、それに応じて、矢印271で示す方向に前記入射位置をたとえば符号280~282で示す各点などのように選択することにより、信号光に求められる分散補償を効果的に行うことができる。

【0060】図3(B)の群速度遅延時間-波長特性曲線の形状からも明らかなように、本発明の光分散補償素子を用いて、たとえば、曲線2801を用いて3次分散補償を行うことができ、曲線2811または2812の比較的直線成分に近い部分を用いて、2次の微細な分散補償を行うことができる。

【0061】本発明の光分散補償素子は、図2に示す光分散補償素子としての多層膜200のように、ウェハー状のものを適当に保持して用いることもでき、また、入射面220内での必要な部分を含むように、小さく厚み方向に、すなわち、入射面220から基板205の方向に、たとえば垂直に、切断したチップ状にして、たとえばファイバコリメータとともに筒状のケースに実装して光分散補償素子として用いることもできるなど、その形態は多様な可能性を有するものであり、そのいずれの場合においても、本発明で説明する主たる効果をもたらすものである。

【0062】

【実施例】図1の光分散補償素子の第1のキャビティと第2のキャビティの共振波長がほぼ一致する波長の光を入射光の中心波長 λ とし、 λ を1550nm近傍に選び、以下のように第1~第3の反射層と、第1と第2の光透過層を形成した。

【0063】<実施例1>図1に示したような断面を有する前記5層の積層膜すなわち前記第1~第5層が、前記多層膜の厚み方向の一方の側から順に、層H、層Lの順に各1層ずつ組み合わせた層（HLの層）を2セット積層して構成される第1層である第1の反射層103と、層Hと層Hを組み合わせた層（HHの層）を14セット積層して構成される第2層である第1の光透過層108と、層Lを1層とHLの層を6セットとを積層して構成される第3層である第2の反射層104と、HHの

層を24セット積層して構成される第4層である第2の光透過層109と、層Lを1層とHLの層を13セットとを積層して構成される第5層である第3の反射層105とでそれぞれ形成されているように図1の光分散補償素子の例としての多層膜100を構成したところ、極めて良好な分散補償を行うことができた。ここにおける分散補償は主として3次分散補償であるが、2次の微細な分散補償としても用いることができる。

【0064】<実施例2>また、実施例1における前記HHの層を14セット積層して形成されている第2層の代わりに、前記第2層が、実施例1におけると同様の方向である膜の厚み方向の一方の側（すなわち、前記第1の反射層103の側）から順に、HHの層を3セット、層Lと層Lを組み合わせた層（すなわち、層Lを2層重ねて形成した層、LLの層）を3セット、HHの層を3セット、LLの層を3セット、HHの層を2セット、LLの層を1セット、HHの層を1セットをこの順に積層して構成される積層膜で形成されているように図1の光分散補償素子の例としての多層膜100を構成したところ、良好な分散補償を行うことができた。ここにおける分散補償は主として3次分散補償であるが、2次の微細な分散補償としても用いることができる。

【0065】<実施例3>また、実施例1および2における前記HHの層を24セット積層して形成されている第4層の代わりに、前記第4層が、実施例1におけると同様の方向である膜の厚み方向の一方の側（すなわち、前記第2の反射層104の側）から順に、HHの層を3セット、LLの層を3セット、HHの層を3セット、LLの層を3セット、HHの層を3セット、LLの層を3セット、HHの層を2セット、LLの層を1セット、HHの層を1セットをこの順に積層して構成される積層膜で形成されているように図1の光分散補償素子の例としての多層膜100を構成したところ、良好な分散補償を行うことができた。ここにおける分散補償は主として3次分散補償であるが、2次の微細な分散補償としても用いることができる。

【0066】<実施例4>さらに、図1の光分散補償素子の例としての多層膜100を、実施例1におけると同様の方向である膜の厚み方向の一方の側から順に、LHの層を4セット積層して構成される第1層である第1の反射層103と、LLの層を9セット積層して構成される第2層である第1の光透過層108と、層Hを1層とLHの層を6セットとを積層して構成される第3層である第2の反射層104と、LLの層を35セット積層して構成される第4層である第2の光透過層109と、層Hを1層とLHの層を13セットとを積層して構成される第5層である第3の反射層105とでそれぞれ形成されているように構成したところ、良好な分散補償を行うことができた。ここにおける分散補償は主として3次分

散補償であるが、2次の微細な分散補償としても用いることができる。

【0067】<実施例5>上記の実施例1～4は、入射光の中心波長 λ が1550nm近傍になるようにして、各光分散補償素子を作成した。

【0068】さらに、実施例1～4と同様の構成にした多層膜を、入射光の中心波長 λ を1550±15nmの範囲で選択できるように、図2と図3で前述した入射面内において膜厚が変化するようにした構成の光分散補償素子としての多層膜200を作成した。

【0069】このように作成した膜厚が前記入射位置によって異なる多層膜のうち、前記実施例2の多層膜の第4層（HHの層を24セット積層して形成した層）の代わりに、前記実施例3の多層膜の第4層を前記第4層として形成した多層膜を用いて、図5の伝送路520のように分散補償ファイバ521とSMF522で構成した伝送長100kmの伝送路を伝送させた40Gbpsの信号光の3次分散補償を行ったところ、通信に全く異常を生じないで通信することができた。さらに、DSFで構成した長さ100kmの伝送路を伝送させた40Gbpsの信号光の3次分散補償を行ったところ、通信に全く異常を生じないで通信することができた。

【0070】上記100kmの伝送路を伝送させた信号光の補償にあたり、上記のように作成した本発明の光分散補償素子としての多層膜200の光入射面220において、まず、図3(A)の矢印270で示す方向に信号光の中心波長 λ に適した大まかな入射位置を選び、さらに、図3(A)の矢印271に相当する方向に前記入射位置を微調整して、図3(A)の点280の位置の近傍で群速度遅延時間-波長特性曲線を測定したところ、 $\lambda=1554\text{nm}$ で図4の曲線401のような群速度遅延時間-波長特性曲線を得ることができた。そして、入射光の入射位置を変化させることにより、波長 λ を上記範囲で選択し、各受信チャンネルに使用することができた光分散補償素子を作成することができた。

【0071】なお、図2、図3で矢印270で示した前記波長 λ を選択する方向は、入射面220内で矢印270とほぼ平行な位置において矢印270の位置以外でも得ることができ、その事情は、前記膜厚を変化させる条件によって変えることができる。

【0072】また、矢印270で示した前記波長 λ を変化させる方向、すなわち波長調整方向と、矢印271で示した群速度遅延時間-波長特性曲線の形状を変化させる方向、すなわち曲線調整方向のなす角度は、+30度～+150度あるいは、-30度～-150度の間の角度とすることが調整のし易さなどの観点から好ましく、本実施例のいくつかの試作において、前記波長調整方向と曲線調整方向のなす角度をほぼ直交するように光分散補償素子を形成したところ、各チャンネルに適した光分散補償素子を容易に製作することができた。

【0073】また、前記波長調整（波長選択）および前記曲線調整（曲線選択）のために、入射光の入射位置を変更する手段としては、入射光の位置に対して、光分散補償素子200あるいは入射光の少なくとも一方を移動させることによって実現した。前記光分散補償素子または入射光を移動させる手段としては、光分散補償素子の使用される事情、コストあるいは特性などの条件など、事情によって種々選択することができる。たとえば、コスト上あるいは装置の事情から、ネジなどの手動的手段により行う方法を用いることができ、また、正確に調整するため、あるいは手動で調整することができない時にも調整することができるようにするためには、たとえば電磁的なステップモータや連続駆動モータを用いることが効果的であり、また、PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）などを用いた圧電モータを使用することも効果的である。また、これらの方法と組み合わせることもできるプリズムや二芯コリメータなどを用いたり、光導波路を利用するなどの光学的手段によって入射位置を選択することにより、容易に、正確に入射位置を選択することができた。

【0074】以上説明した実施例1～5において、前記LHの層は、厚みが4分の1波長の SiO_2 のイオンアシスト蒸着で作成した膜（以下、イオンアシスト膜ともいう）で形成された層Lと、厚みが4分の1波長の TiO_2 のイオンアシスト膜で形成された層Hとから構成されており、前記 SiO_2 のイオンアシスト膜（層L）1層と TiO_2 のイオンアシスト膜（層H）1層の組み合わせ層でLHの層1セットと称し、たとえば、「LHの層5セット積層して」とは、「層L・層H・層L・層H・層L・層H・層L・層Hの順に各層をそれぞれ1層ずつ重ねて形成して」ということを意味する。

【0075】同様に、前記LLの層は、厚みが4分の1波長の SiO_2 のイオンアシスト膜で構成されている層Lを2層重ねて形成した層をLLの層1セットと称す。したがって、たとえば、「LLの層を3セット積層して」とは、「層Lを6層重ねて形成して」を意味する。

【0076】なお、層Hを形成する膜の組成として、誘電体の例を示したが、本発明はこれに限定されるものではなく、 TiO_2 と同じ誘電体材料としては TiO_2 の他に、 Ta_2O_5 、 Nb_2O_5 などを用いることができ、さらに、誘電体材料の他に、 Si や Ge を用いて層Hを形成することもできる。 Si や Ge を用いて層Hを形成した場合、光学的性質より層Hを薄く形成することができるという利点を有する。また、層Lの組成として SiO_2 の例を示したが、 SiO_2 は安価にしかも信頼性高く層Lを形成できる利点があるが、本発明はこれに限定されるものではなく、層Hの屈折率よりも屈折率が低くなる材質によって層Lを形成すれば、本発明の上記効果を発揮する光分散補償素子を実現することができる。

【0077】また、本実施例では、前記多層膜を構成する層Lと層Hをイオンアシスト蒸着で形成したが、本発明はこれに限定されるものではなく、通常の蒸着、スパッタリング、イオンプレーティングその他の方法で形成した多層膜を用いても本発明は大きな効果を発揮するものである。

【0078】次に、図2、図3などで説明した多層膜を構成する層の膜厚を前記入射面内方向において、変化させる方法について、以下に説明を加える。

【0079】本発明の光分散補償素子を、分散補償を施したい信号光の中心波長 λ に適宜合わせる（以下、波長選択するともいう）ことができるように、そして、分散補償を施したい程度、すなわち、分散補償量を適宜選択できるように、光分散補償素子を構成する多層膜の膜厚を前記入射面内方向において変化させる場合、前記光透過層の膜厚を適切に変化させることが特に重要であり、光分散補償素子の仕様に合わせて、前記入射面内方向における前記第1と第2の光透過層の一方もしくは双方の膜厚を変化させるように形成する。1つの例として、前記実施例5においては、図2に矢印250で示した方向に第1の光透過層の膜厚を変化させて形成し、すなわち、図の右側から左側に移動するにつれて膜厚が厚くなるように形成し、矢印260で示した方向に第2の光透過層の膜厚を変化させて形成し、すなわち、図の手前から奥の方向に移動するにつれて膜厚が厚くなるように形成した。このとき、反射層の膜厚は、各光透過層に大まかに合わせて変化するように形成すれば、信頼性上有利になるばかりでなく、製造コストが低減されるなどの効果がある。1つの光透過層の膜厚変化に対して、膜厚の変化している反射層が1層である場合、2層である場合、あるいは膜厚の変化していない反射層がある場合を使い分けることができる。

【0080】また、前記多層膜の膜厚の変化のさせ方は、前記入射位置を選択する場合に、表示し易くする場合などのためから膜厚が単調に変化するようにする場合と、小型化や用途を広くするためなどに極値を有する2次曲線状やステップ状など単調に変化しないようにする場合があり、光分散補償素子が使用される条件によって種々選択することができる。

【0081】この膜厚変化のさせ方は、光分散補償素子の入射光の位置を変える場合の変化させ易さや信頼性など、光分散補償素子に要求される事情によって選択するようにすることが好ましい。

【0082】本発明の光分散補償素子は、前記多層膜を構成する第1層～第5層の各層を、所望の入射光の中心波長に対して前記の例の如く形成し、波長選択機能を有しない形態に作成することもでき、また光分散補償対象波長（分散補償したい入射光の中心波長）と光分散補償量を変化させることができる形態に作成することもできる。

【0083】そして、本発明の光分散補償素子の光分散補償対象波長は、基本的には光通信に使用されるすべての波長に適用できるが、現存通信装置等の活用の観点から1460～1640nmの範囲の使用される通信システムの波長帯域に対して適用できるようにすることにより、極めて大きな効果を有するものであり、本発明は、使い勝手がよく、信頼性の高い光分散補償素子を安価に提供することができ、通信の高速化に対応するには、従来用いられている光ファイバは使えないといわれている現状を一変し、従来用いられている光通信設備のかなり

10 部分を活用して、高速・遠距離通信を行うことができる。そして、前記1460～1640nmの波長帯域を複数種類の光分散補償素子でカバーするようにすることにより、利便性をさらに高めることができる。

【0084】また、本発明の光分散補償素子の特徴は、主として第1の反射層と第1の光透過層と第2の反射層とで形成される第1のキャビティの共振波長の1つと、主として第2の反射層と第2の光透過層と第3の反射層とで形成される第2のキャビティの共振波長の1つが一致するようにしてあることである。

【0085】以上の如き多層膜を使用した本発明の光分散補償素子の各種例を作成し、特性を測定した結果、前記の優れた群速度遅延時間－波長特性が得られ、3次分散の良好な補償ができたのに加えて、入出力光の差すなわち分散補償素子を挿入することによる信号光の損失を0.5dB以下の極めて低い値にすることができた。

【0086】

【発明の効果】以上、実施例も含めて説明したように、本発明の光分散補償素子は、従来は補償が行われなかった3次以上の分散すなわち長距離通信や高速通信において問題になる3次の分散を完全に補償することができ、しかも損失が少なく、構造が簡単で、製造し易く、量産コストも安いという大きな効果を有するとともに、既存の光通信システムの多くを利用することを可能にする点で、社会的経済効果が多大なものである。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光分散補償素子の例としての多層膜を説明する断面図である。

【図2】本発明の膜厚変化をさせた光分散補償素子の例

としての多層膜を説明する斜視図である。

【図3】本発明の実施例における入射面内の入射位置と群速度遅延時間－波長特性の変化を説明する図であり、(A)は入射面を、(B)は群速度遅延時間－波長特性曲線を説明する図である。

【図4】本発明の実施例における群速度遅延時間－波長特性曲線の例を示すグラフである。

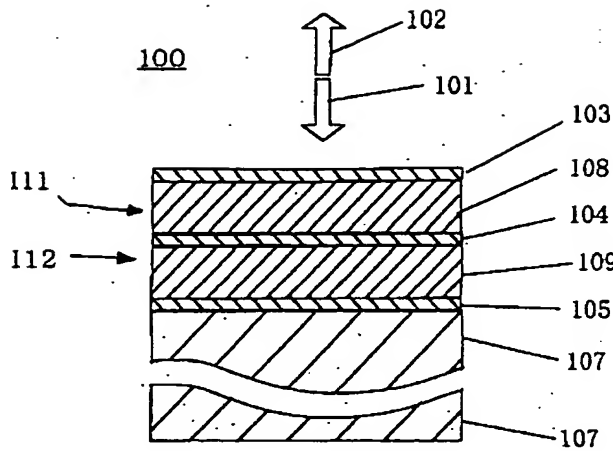
【図5】2次と3次の波長分散の補償方法を説明する図であり、(A)は波長－時間特性と光強度－時間特性を、(B)および(C)は伝送路を説明する図である。

【図6】従来の光ファイバの分散－波長特性を示すグラフである。

【符号の説明】

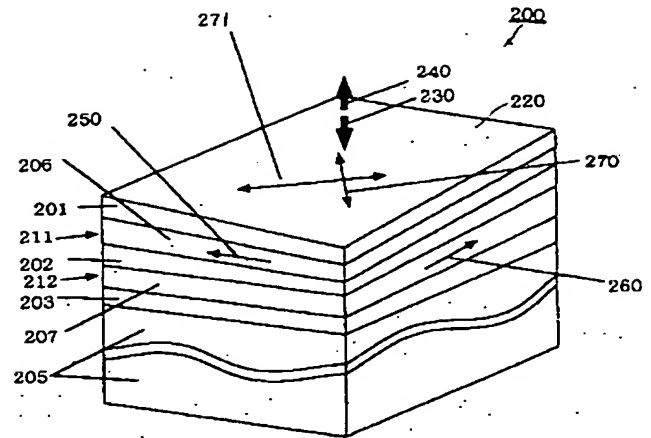
100, 200 : 多層膜
 101, 230 : 入射光の方向を示す矢印
 102, 240 : 出射光の方向を示す矢印
 103, 104, 105, 201, 202, 203 : 反射層
 108, 109, 206, 207 : 光透過層
 20 107, 205 : 基板
 111, 112, 211, 212 : キャビティ
 220 : 入射面
 250, 260 : 膜厚変化方向を示す矢印
 270 : 波長調整方向
 271 : 曲線調整方向
 280, 281, 282 : 入射位置
 2801, 2811, 2812, 401 : 分散－波長特性曲線
 501, 502, 503, 504, 511, 512, 513, 514 : 信号光の特性を示すグラフ
 520, 530 : 伝送路
 521 : 分散補償ファイバ
 522, 531 : SMF
 524, 534 : 送信器
 525, 535 : 受信器
 601 : SMFの分散－波長特性曲線
 602 : 分散補正ファイバの分散－波長特性曲線
 603 : DSFの分散－波長特性曲線

【図 1】



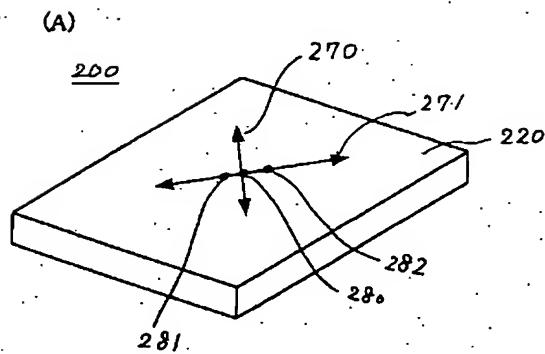
100:多層膜
 101:入射光の方向を示す矢印
 102:出射光の方向を示す矢印
 103,104,105:反射層
 108,109:光透過層
 107:基板(BK-7ガラス)
 111,112:キャビティ

【図 2】

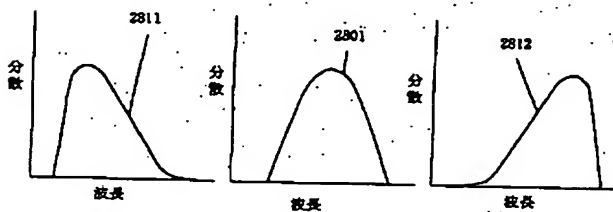


200:多層膜
 201, 202, 203:反射層
 205:基板
 206, 207:光透過層
 211, 212:キャビティ
 220:入射面
 230:入射方向
 240:出射方向
 250, 260:膜厚変化方向
 270:波長調整方向
 271:曲率調整方向

【図 3】

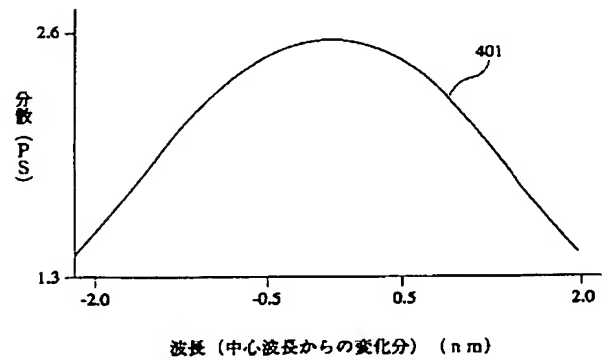


(B)

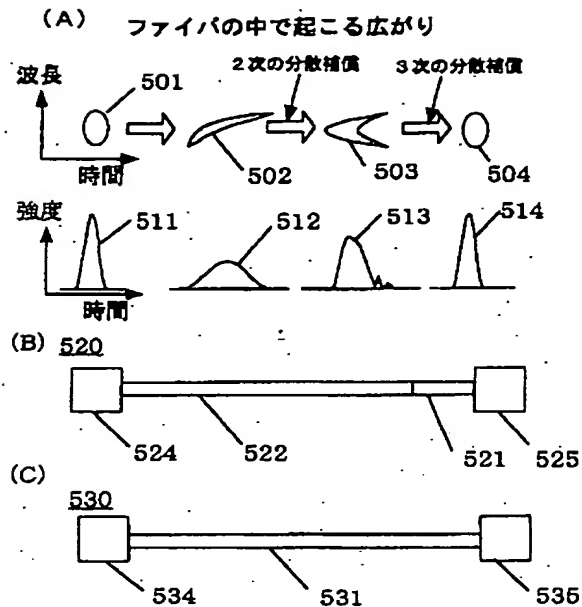


280, 281, 282: 入射位置

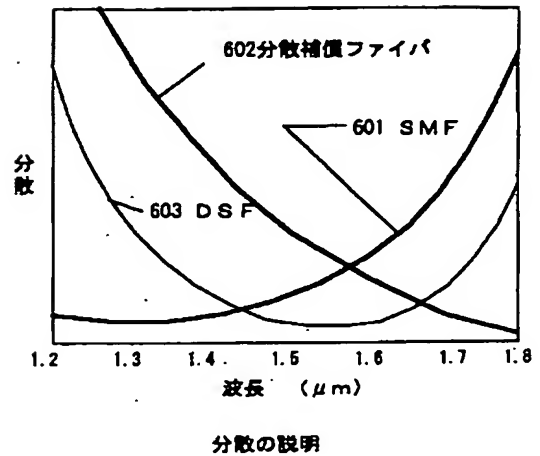
【図 4】



【図 5】



【図 6】



フロントページの続き

(72)発明者 多久島 裕一
埼玉県川口市芝富士2丁目18番18号 セイ
ケイハイツ202号

(72)発明者 マーク ケンネス ジャボロンスキー
東京都目黒区駒場4丁目6番29号 K518

(72)発明者 田中 佑一
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式
会社応用光電研究室内

(72)発明者 片岡 春樹
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式
会社応用光電研究室内

(72)発明者 古城 健司
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式
会社応用光電研究室内

(72)発明者 東 伸
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式
会社応用光電研究室内

(72)発明者 佐藤 一也
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式
会社応用光電研究室内

Fターム(参考) 2H048 GA07 GA11 GA33 GA35 GA48
GA62
5K002 BA21 CA01 DA05 FA01